

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ

## Литература:

*Электротехника и электроника. В 3-х книгах. Кн. 2. Электромагнитные устройства и электрические машины.* Под. ред. В.Г. Герасимова. – М.: Энергоатомиздат, 1997

*Электрические машины. Лабораторно-практические занятия: методическое пособие.* В.И. Киселев, Е.И. Рослякова, И.В. Сильванский, М.Л. Солодова. – М.: Изд-во МЭИ, 2005

*Электрические машины. Сборник индивидуальных заданий: методическое пособие.* В.И. Киселев, Е.И. Рослякова, И.В. Сильванский. – М.: Изд-во МЭИ, 2002

*Электротехника и электроника. В 3-х книгах. Кн. 3. Электрические измерения и основы электроники.* Под ред. В.Г. Герасимова. – М.: Энергоатомиздат, 1998 г.

*Лабораторно-практические занятия по дисциплине «Электротехника и электроника». Основы электроники.* О.М. Князьков, Е.В. Комаров, Е.И. Рослякова/Под ред. М.С. Цепляевой. – М.: МЭИ, 2000 г.

*Основы электроники. Сборник индивидуальных заданий.* О.М. Князьков, Е.И. Рослякова, М.Л. Солодова, В.Б. Соколов. – М.: МЭИ, 2002 г.

## Общие положения

Электрическая машина – электромагнитный преобразователь, предназначенный для преобразования электрической энергии в механическую и обратно.

В основе действия любой электрической машины лежит закон силового взаимодействия электрического заряда с электрическим и магнитным полем (сила Лоренца):

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{E} + \vec{V} \times \vec{B})$$

Если от общего вида перейти к более привычным формулировкам, то мы имеем закон электромагнитной индукции и закон Ампера.

### Закон электромагнитной индукции.

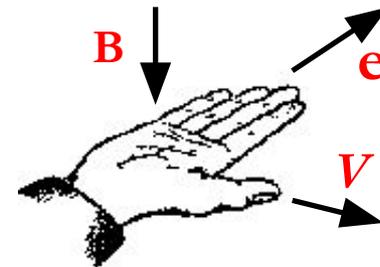
Если перемещать проводник в магнитном поле, на заряд будет действовать сила (электродвижущая), направленная перпендикулярно к вектору магнитного поля и вектору скорости.  $F = q \cdot [V \times B]$

Часто направление ЭДС определяют с помощью «правила правой руки»: если силовые линии входят в ладонь, большой палец направлен по направлению движения проводника относительно магнитного поля, тогда 4 пальца покажут направление ЭДС.

Бесконечно перемещать проводник в магнитном поле получается только при вращательном движении проводника. Обычно используют проводники типа рамки, вращающиеся в магнитном поле. Если вдоль проводника просуммировать все силы, действующие на заряд, мы получим напряжение (ЭДС) на зажимах витка:

$$\varepsilon = - \frac{d\Phi}{dt}$$

Из 3-на электромагнитной индукции следует возможность получить в проводнике (или витке) только переменную ЭДС, т.к. бесконечно изменять магнитный поток нельзя.

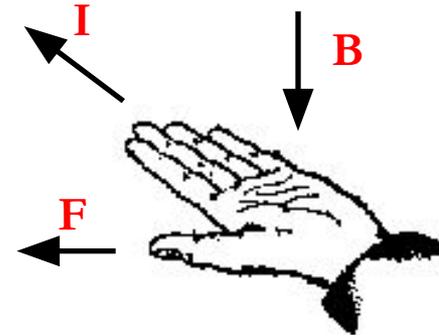


# Общие положения

**Закон Ампера.** Если в проводнике, находящемся в магнитном поле, есть ток (движущиеся заряды), то на проводник (на движущиеся в нем заряды) будет действовать сила, перпендикулярная направлению тока и магнитного поля.

$$\vec{dF} = I \cdot (\vec{dl} \times \vec{B})$$

Направление действия силы Ампера определяют по «правилу левой руки»: если силовые линии магнитного поля входят в ладонь, 4 пальца направлены по току, тогда большой палец показывает направление силы Ампера.



Итог:

- Чтобы получить напряжение, необходимо создать переменный магнитный поток через рамку (*принцип работы любого генератора*).
- Чтобы получить вращающий момент (силу), необходимо пропустить ток через проводник, находящийся в магнитном поле (*принцип работы любого двигателя*).

В зависимости от способа создания магнитного поля и способа создания тока в проводнике электрические машины делятся на машины постоянного тока (ПТ, используют постоянное поле и постоянный ток) и машины переменного тока. Последние делятся на асинхронные (частота вращения не равна частоте поля) и синхронные (частота вращения равна частоте поля).

# Раздел 1. Машины постоянного тока

## 1.1. Устройство машин постоянного тока

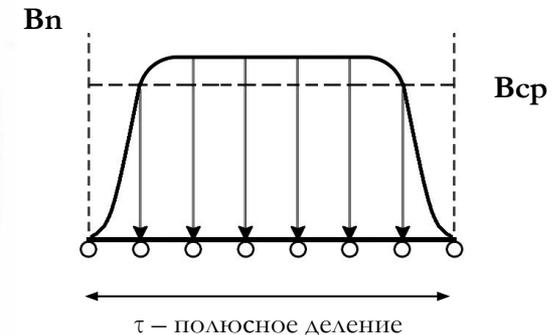
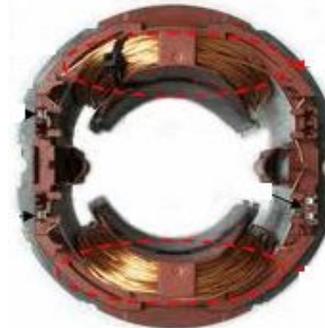
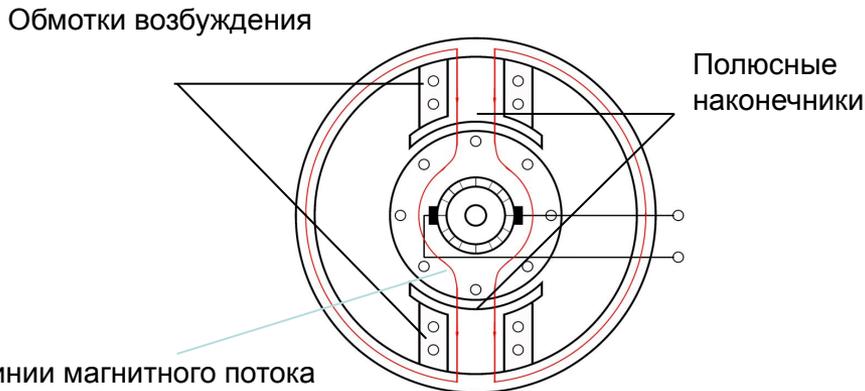
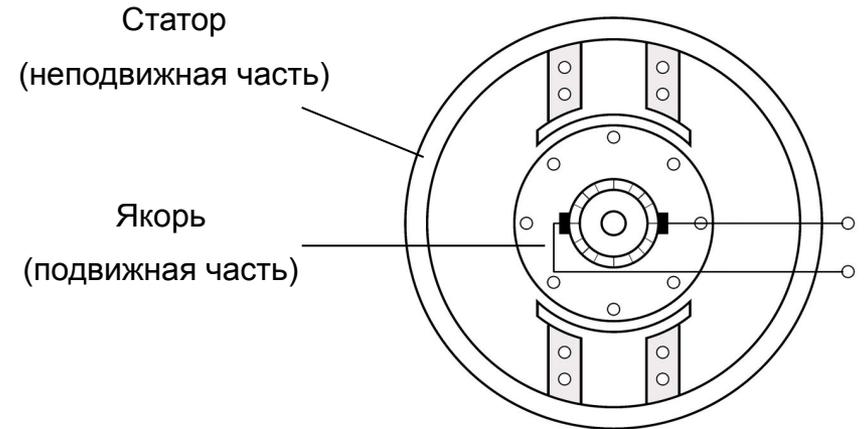
В МПТ используются постоянные токи и постоянное магнитное поле.

Принцип любого генератора: чтобы получить ЭДС, нужно вращать рамку в магнитном поле. Принцип двигателя: чтобы вращать проводник, нужно поместить проводник с током в постоянное магнитное поле. В обоих случаях проводник с током либо вращается (двигатель), либо проводник вращают (генератор) в неподвижном поле. Поэтому устройство всех МПТ одинаково независимо от их назначения – генератор или двигатель.

МПТ состоит из двух частей: неподвижный статор и подвижный ротор.

### Статор

Функция статора – создать постоянное магнитное поле, в которое помещают проводники ротора. По сути статор – это магнитопровод, на котором находятся катушками с постоянным током или постоянные магниты. Магнитный поток зависит от МДС катушек ( $F = I \cdot w$ ) и магнитного сопротивления магнитной цепи. Поэтому катушки статора (их называют обмотками возбуждения) обычно имеют большое число витков, а сам статор выполняется массивным (чем больше площадь сечения тем меньше магнитное сопротивление). Обмотки намотаны на ферромагнитных полюсных наконечниках. Поле замыкается по ферромагнитной станине. Статор проектируют так, чтобы магнитная индукция под полюсом была постоянна.

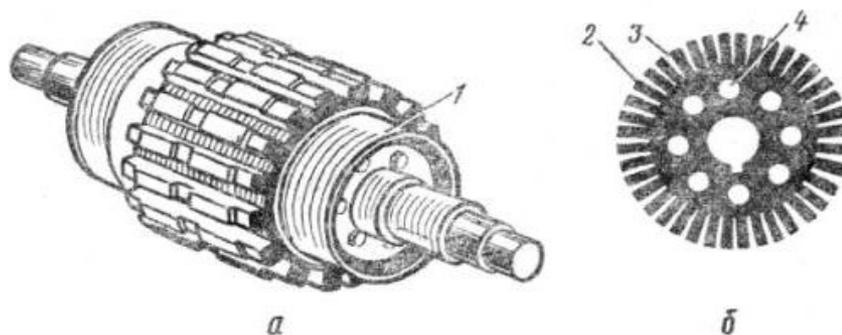


Линии магнитного потока

# Якорь

Якорь - вращающаяся часть МПТ (в других машинах ее называют ротор).

Т.к. магнитный поток обмоток возбуждения проходит через ротор, его тоже выполняют из ферромагнитного материала. Т.к. ротор вращаясь перемагничивается, материал требуется магнитомягкий, а чтобы снизить потери на вихревые токи, якорь набирают шихтованным из отдельных пластин (см. рис. б). На якоре есть пазы, в которые укладывается обмотка якоря.

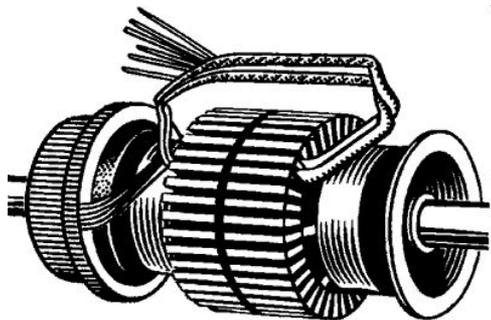


Конструкция МПТ на первый взгляд довольно сложная, но, если понять трудности, с которыми конструктор сталкивается при разработке машины все становится проще и даже безальтернативно.

## Сложность первая. Как соединять витки обмотки якоря?

Дело в том, что в одном витке ЭДС не велика. Например, при индукции поля статора 1 Тл (это много!) и размерах якоря около 20 x 40 см при частоте вращения 50 Гц мы получим ЭДС... всего-то 1,5 В – как у пальчиковой батарейки.

Естественно, от генератора хотят получить ЭДС побольше, а для этого нужно на якоре располагать много витков и соединять их последовательно.



витки обмотки якоря

Витки могут состоять из одного проводника, но чаще – это группа проводников, выполненная в виде рамки, укладываемой в паз якоря. Геометрический размер зависит от числа пар полюсов статора (в общем случае – это размер полюсного деления  $\tau$  – длины дуги окружности, на которой поле статора имеет один знак). На приведенной картинке виток занимает четверть длины окружности якоря, это соответствует двум парам полюсов (два северных и два южных, чередующихся меж собою).

**Сложность вторая. Как соединить начала и концы обмоток и как снять с них ЭДС (подвести к ним ток)?** Мы знаем, что электрически это последовательное соединение, а вот как физически соединить начала и концы витков?

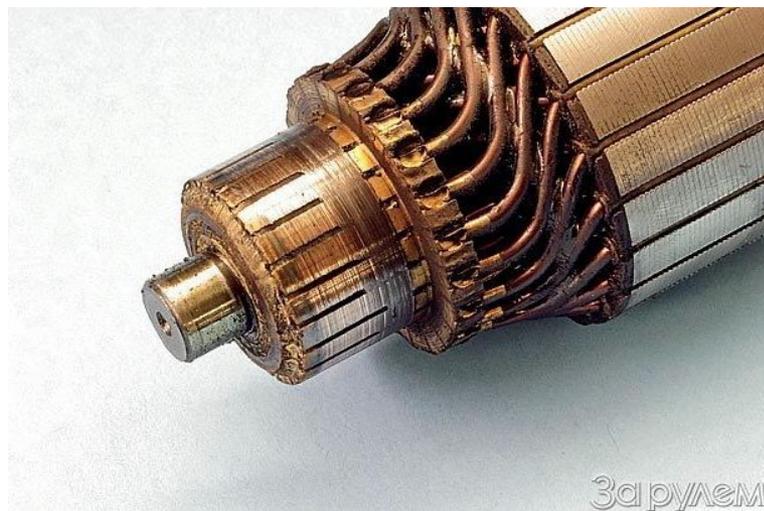
Т.к. якорь (и витки) вращаются, а контакты генератора очевидно неподвижны, то техническое решение одно – нужно сделать скользящий контакт!

Для соединения витков друг с другом и организации скользящего контакта служит щеточно-коллекторный узел.

Коллектор – это цилиндр, на котором расположены медные пластины, друг от друга изолированные. К каждой пластине припаян конец  $i$ -й обмотки и начало  $i+1$ -й – так обеспечивают последовательное соединение витков.

К пластинам коллектора прижимают как правило графитовые щетки (их след можно видеть на фотографии коллектора).

При вращении якоря щетки искрят и изнашиваются, что ограничивает применение МПТ (в самолет такое не поставишь и во взрывоопасных средах якорь не покрутишь!)



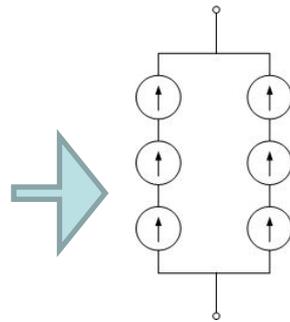
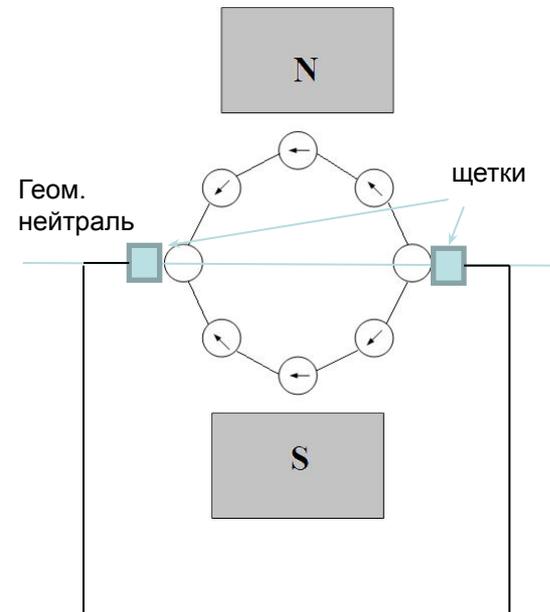
В простых МПТ типа тех, что используются в вентиляторах, число витков ротора не велико, пластин коллектора – тоже. Но в мощных МПТ, где много более жесткие требования к постоянству момента, витков больше, и они становятся довольно сложными в сборке, при этом надежность падает (надежность обратно пропорциональна корню из числа элементов устройства)

### И третий вопрос: где расположить щетки?

Щеток две, а пластин коллектора много. И к каким пластинам нужно подключать щетки?

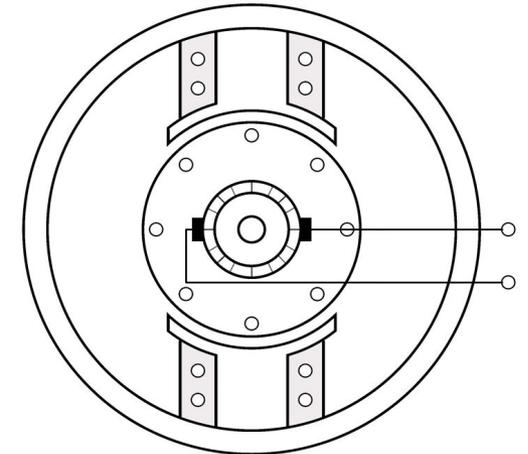
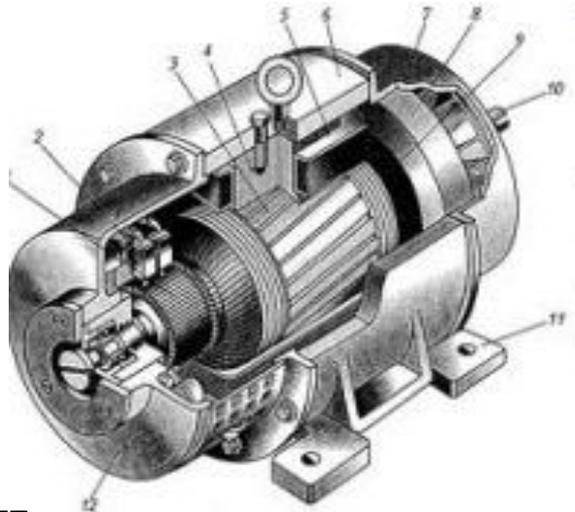
Важно понимать, что все витки друг с другом соединены последовательно. Но щетки, будучи подключенными к двум пластинам коллектора, делят этот замкнутый контур из витков якоря на две части.

Если мы рассмотрим генератор, где якорь вращается, то увидим, что во всех проводниках, летящих в магнитном поле статора условно направо, ЭДС положительны, а в другой половине витков, летящих условно налево – отрицательно. Их сумма в замкнутом контуре равна нулю. Понятно, что щетки нужно располагать так, чтобы между щетками суммарное ЭДС витков было максимальным. Так получается, если щетки будут расположены на геометрической нейтрали и контактируют с проводниками, в которых в данный момент ЭДС нет вовсе. Если статор имеет число пар полюсов более 1, то щеток нужно пропорционально больше.



Аналогичный результат мы получим, если рассмотрим двигатель. В двигателе нужно получать максимальный момент, так получится, когда под полюсом статора находятся витки с одинаковым направлением тока. Обеспечить это условие можно только расположив щетки на геометрической нейтрали.

**Получается, что устройство всех МПТ одинаково, и работать МПТ может как генератор и как двигатель**



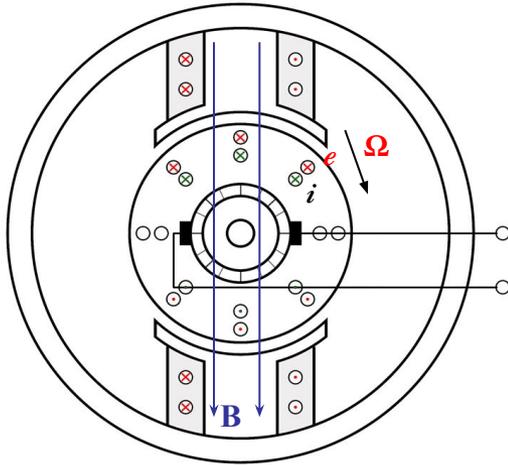
Эскиз МПТ

Конструкция МПТ

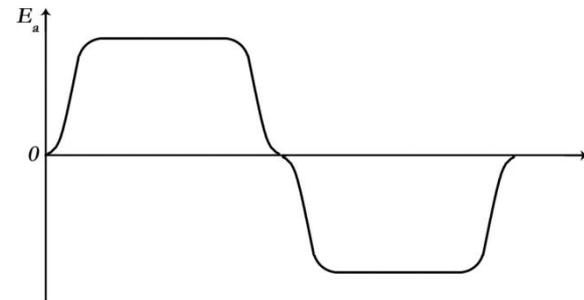
## 1.2. Принцип действия генератора постоянного тока

Якорь ГПТ приводится во вращение с постоянной частотой  $n$  (двигателем, например), на катушки возбуждения подается напряжение, что приводит к возникновению тока возбуждения, индукции  $B$  и магнитного потока возбуждения  $\Phi$ .

В проводнике, перемещающемся в магнитном поле, возникает ЭДС. Направление ЭДС определяется по правилу правой руки (красные крестики и точки: крестики – направление эдс от нас, точки – на нас).

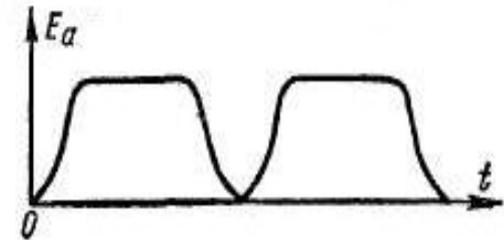
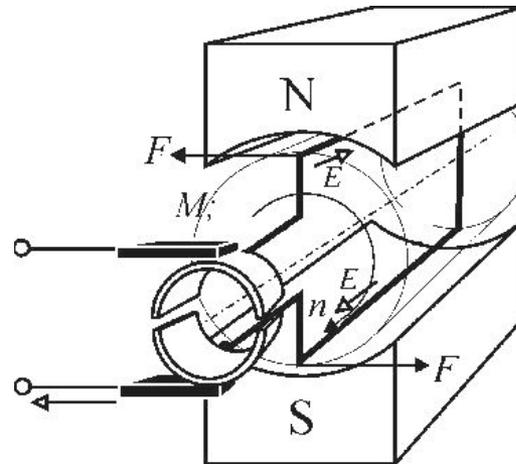


ЭДС в одном витке изменяется во времени так же, как изменяется магнитная индукция по длине окружности якоря ( $e = B \cdot v \cdot l$ ):



Возникает вопрос: а как же получить постоянную ЭДС?

Отвлечемся и представим себе один виток. ЭДС в нем переменна во времени. Но мы снимаем ЭДС не с витка напрямую, а с щеток. Щетки подключены к вращающемуся коллектору и оказывается, что пластины коллектора переключаются на другую щетку с тем же периодом, с каким меняется знак ЭДС витка. В результате на щетках знак ЭДС одинаков! Т.е. Щетки выполняют роль механического выпрямителя – из переменного напряжения делают напряжение постоянной полярности.

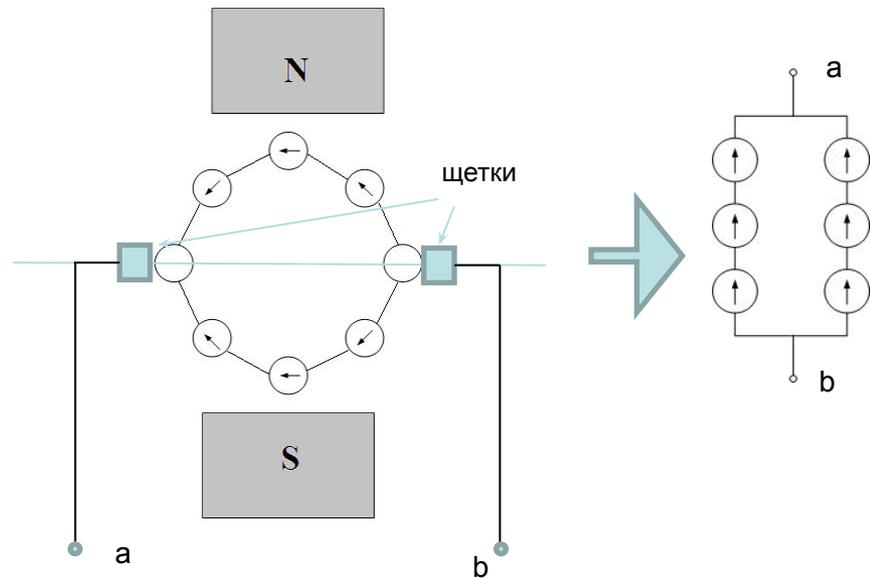


ЭДС на щетках в случае якоря с одним витком

В ГПТ все то же самое происходит, только витков якоря много, соединены витки последовательно, а щетки расположены на геометрической нейтрали.

Т.к. все витки соединены последовательно, суммарная ЭДС в обмотке якоря равна нулю, и тока в обмотке якоря в отсутствие нагрузки нет!

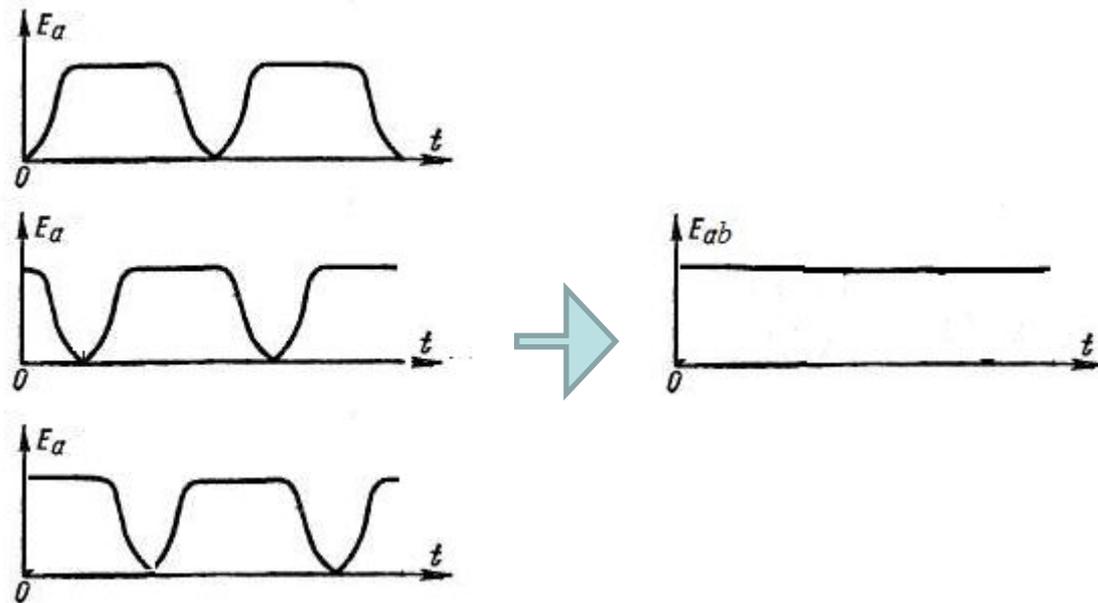
Неподвижные щетки расположены на геометрической нейтрали и контактируют с проводниками, ЭДС в которых равна нулю. При этом щетки делят обмотку якоря на две половины, ЭДС витков в которых относительно щеток имеют один знак!



В каждом из витков ЭДС относительно щеток постоянна по знаку, но между витками существует сдвиг по фазе за счет разного положения витков на якоре.

Т.к. щетки делят обмотку на две параллельные ветви, в каждой из которых ЭДС витков суммируются, то относительно щеток общее напряжение оказывается практически постоянным. Чем больше число витков, тем ближе напряжение к константе.

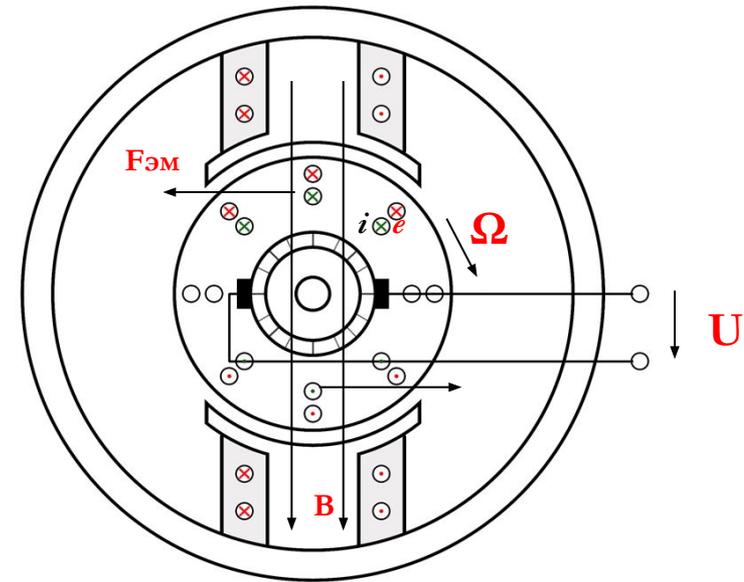
Таким образом с якоря снимается постоянная ЭДС.



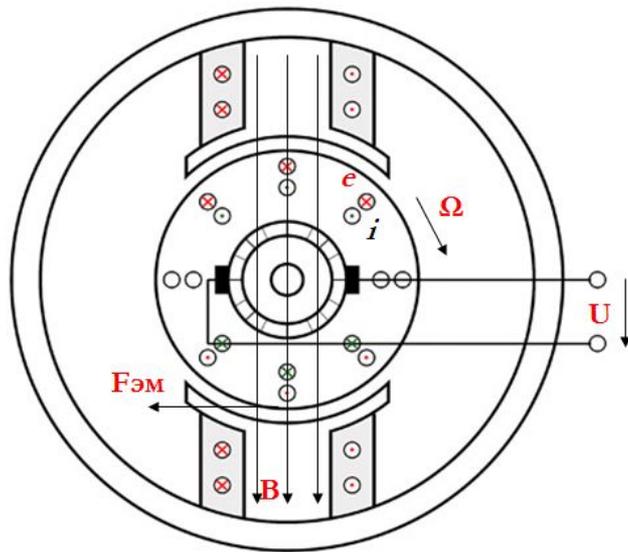
Если к щеткам подключить нагрузку, в витках обмотки якоря потечет ток, сонаправленный с ЭДС. На ток, находящийся в магнитном поле, действует сила Ампера, направление которой определяется по правилу левой руки.

Сила Ампера в ГПТ всегда направлена против направления вращения якоря! Таким образом, при подключении нагрузки ГПТ создает противодействующий (тормозящий) момент.

Чем больше ток, потребляемый нагрузкой (чем больше отдаваемая в нагрузку электрическая мощность), тем больший момент сопротивления должен преодолевать двигатель, вращающий якорь (т.е. тем большая механическая мощность должна подводиться к ГПТ).



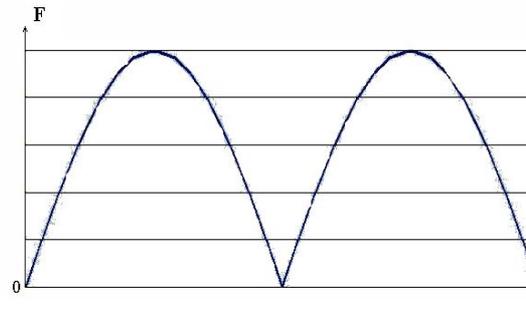
### 1.3. Принцип действия двигателя постоянного тока



Конструктивно ДПТ выполняется так же, как и ГПТ. Поле возбуждения создается так же: к обмотке возбуждения на статоре подается напряжение возбуждения, вызывающее постоянный ток в обмотках.

Если подвести к щеткам напряжение  $U$  от внешнего источника, в обмотке якоря потечет ток.

В проводниках, находящихся под одним полюсом, ток имеет одинаковое направление, поэтому силы складываются, образуя результирующий вращающий момент.



Вращающий момент, приложенный к одному витку, не постоянен во времени. Постоянство вращающего момента достигается за счет сложения моментов большого числа витков, т.к. зависимости момента от времени в разных витках отличаются по фазе. (аналогично получению постоянной ЭДС в генераторе)

Вращающий момент приводит якорь во вращение.

А дальше все почти как в генераторе: в проводнике, перемещающемся в магнитом поле, возникает ЭДС. Направление ЭДС противоположно току, его можно отследить по правилу правой руки. Из-за направления ЭДС ее называют «противоЭДС». Чем быстрее вращается якорь, тем противоЭДС больше (см. 3-н электромагнитной индукции). Ток в обмотке якоря зависит от разности напряжения на якоре  $U$  и противоЭДС, а момент вращения зависит от тока. Получается, что чем быстрее вращается якорь, тем меньше ток и меньше вращающий момент. Если представить себе идеальный двигатель без трения и потерь, то у него рост частоты вращения прекратится, когда противоЭДС уравнивает напряжение якоря  $U$ . Эта частота вращения соответствует холостому ходу и является максимально возможной при прочих равных.

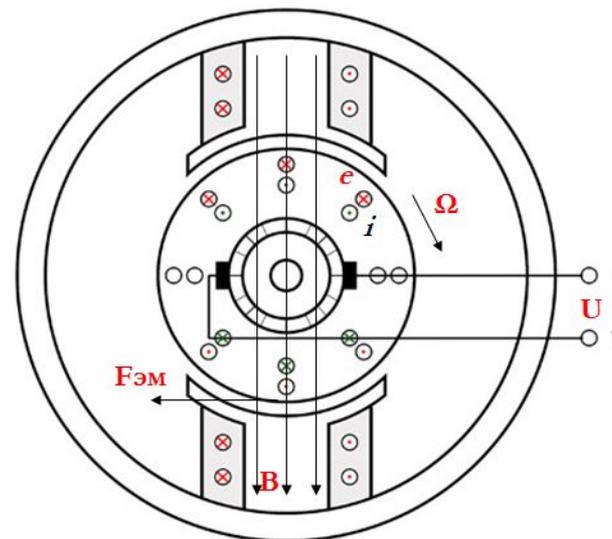
Если двигатель нагрузить (подключить устройство, которое нужно вращать, например, ГПТ или редуктор), то в силу появления момента сопротивления нагрузки ДПТ будет снижать скорость вращения. Одновременно снижается противоэдс и увеличивается ток якоря. Ток якоря вызывает вращающий момент, который компенсирует действие момента нагрузки. Частота вращения ДПТ при этом установится постоянной (но меньше частоты на холостом ходу), ДПТ будет работать в устойчивом состоянии, потребляя от источника ток якоря.

Чем больше момент сопротивления, тем больше будет момент вращения ДПТ, тем больший ток якоря ДПТ должен потреблять. (Чем больше механическая мощность, отдаваемая двигателем в нагрузку, тем большую электрическую мощность двигатель должен потреблять от источника напряжения)

Важно, что при изменении нагрузки мы не вмешиваемся в работу ДПТ, он сам меняет момент и частоту!

Описанный процесс по-научному называется свойством саморегулирования, это способность двигателя самостоятельно, без вмешательства человека, устанавливать момент вращения, равный моменту нагрузки. Это свойство очень ценное, оно позволяет устройству работать в автоматическом режиме! Не имя свойства саморегулирования нам пришлось бы постоянно что-то регулировать. Двигатель внутреннего сгорания не имеет свойства саморегулирования, поэтому, чтобы ехать в гору, водитель нажимает на акселератор. А вот имея ДПТ, автомобиль заехал бы сам (только это не нужно в автомобиле, водителю же порулить охота).

Ну и в конце напомним, что МПТ полностью обратимы. Физические процессы практически одинаковы в ГПТ и ДПТ. Якорь генератора мы крутим, чтоб получить напряжение. При подключении нагрузки ГПТ создает противодействующий тормозящий момент. В ДПТ мы напряжение подаем на якорь, получаем ток и вращающий момент. При вращении ДПТ создает противо-ЭДС. В общем-то это фундаментальное свойство всех систем (не только технических): под внешним воздействием они меняются так, чтобы минимизировать это воздействие. Поэтому ГПТ стремится уменьшить приложенный момент вращения, а ДПТ - уменьшить приложенное напряжение.



## 1.4. ЭДС и момент МПТ

Советую посмотреть вывод в учебнике, т.к. нарисовать все нужные картинку мне трудно.

ЭДС в одном проводнике

$$e = B_n \cdot l \cdot V$$

$l$  – длина проводника,

$V$  – скорость движения проводника в магнитном поле

$$V = \frac{D}{2} \cdot \Omega$$

$D$  – диаметр якоря,  $\Omega$  – угловая скорость

ЭДС якоря (щетки делят обмотку якоря на две параллельные ветви, поэтому в ЭДС – сумма не по всем виткам, а по половине)

$N$  – число витков обмотки якоря

$$E_{\text{я}} = \sum_{n=1}^{\frac{N}{2}} e_n$$

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{\Phi}{l \cdot \tau} = \frac{\Phi}{l \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot D}{p}}$$

$\Phi$  – магнитный поток полюсов статора,  $\tau$  - полюсное деление,  $p$  – число пар полюсов

$$E_{\text{я}} = p \cdot \frac{N}{2 \cdot \pi} \cdot \Omega \cdot \Phi$$

Обозначим

$$c_e = p \cdot \frac{N}{60}$$

$$n = 60 \cdot \frac{\Omega}{2 \cdot \pi}$$

- скорость вращения в об/мин. (В электрических машинах принято скорость вращения употреблять в об/мин)

Получим:

$$E_{\text{я}} = c_e \cdot n \cdot \Phi$$

В итоге получили несколько переименованный 3-н электромагнитной индукции: ЭДС зависит от частоты  $n$  изменения потока  $\Phi$

## Электромагнитный момент

Сила Ампера  $F = B_n \cdot l \cdot I_{я}$

Электромагнитный момент  $M = \frac{D}{2} \cdot F \cdot N = \frac{I_{я} \cdot B_n \cdot l \cdot D \cdot N}{2}$

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{\Phi}{l \cdot \tau} = \frac{\Phi}{l \cdot \frac{2 \cdot \pi \cdot D}{p}}$$

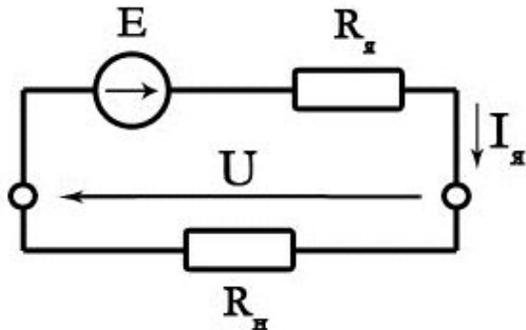
$$M = c_M \cdot I_{я} \cdot \Phi$$

ЭДС и момент не зависят от типа машины! От типа машины зависит их знак.

## 1.5. Схема замещения обмотки якоря МПТ

- Генератор

Схема замещения – это модель процессов в устройстве, выраженная языком идеальных элементов. В генераторе мы вращаем якорь в магнитном поле и **получаем ЭДС**. Поэтому в схеме замещения должен быть источник ЭДС. Как только мы подключаем к приёмнику якорь, течет ток якоря. Когда по проводам течет ток, провод нагревается. Необратимое выделение тепла на проводах в схеме замещения моделируется резистором – в схеме должен быть резистор  $R_{я}$ . Больше никаких процессов у нас нет, и мы получаем схему замещения обыкновенного активного двухполюсника. Обращаю внимание на то, что  $E_{я}$  – причина возникновения тока якоря, поэтому ток сонаправлен с ЭДС.



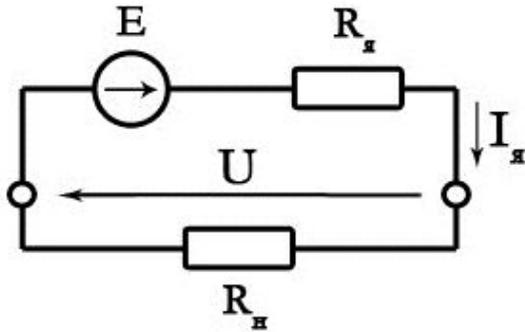
Уравнение состояния цепи якоря генератора:

$$U = E_{я} - I_{я} \cdot R_{я}$$

## 1.5. Схема замещения обмотки якоря МПТ

- Генератор

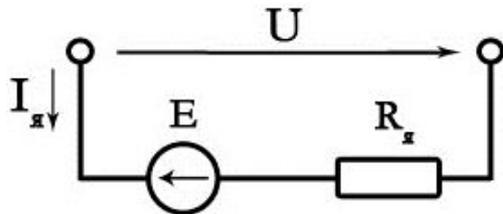
Схема замещения – это модель процессов в устройстве, выраженная языком идеальных элементов. В генераторе мы вращаем якорь в магнитном поле и **получаем ЭДС**. Поэтому в схеме замещения должен быть источник ЭДС. Как только мы подключаем к приёмнику якорь, течет ток якоря. Когда по проводам течет ток, провод нагревается. Необратимое выделение тепла на проводах с схеме замещения моделируется резистором – в схеме должен быть резистор  $R_{\text{я}}$ . Больше никаких процессов у нас нет, и мы получаем схему замещения обыкновенного активного двухполюсника. Обращаю внимание на то, что  $E_{\text{я}}$  – причина возникновения тока якоря, поэтому ток сонаправлен с ЭДС.



Уравнение состояния цепи якоря генератора:

$$U = E_{\text{я}} - I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}$$

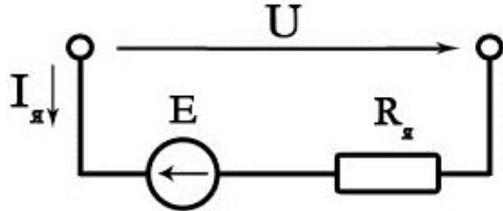
- Двигатель



$$U = E_{\text{я}} + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}$$

- Двигатель

К якору мы подводим напряжение  $U$ . Оно вызывает ток в якоре и нагрев обмотки якоря, следовательно в цепи должен быть резистор  $R_{\text{я}}$ . Под действием вращающего момента якорь вращается, при этом возникает противоЭДС  $E_{\text{я}}$ , направленная против тока, поэтому в схеме замещения должна быть ЭДС, направленная против напряжения питания (и тока)



$$U = E_{\text{я}} + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}$$

*Двигатель – типичный пример активного приемника, выражаясь языком электрических цепей.*

## 1.6. Способы возбуждения МПТ

Рассматривая принцип действия, мы говорили: обмотка возбуждения подключается к источнику напряжения. Но не оговаривали, что это за источник. Вот теперь мы посмотрим, откуда же брать напряжение для создания магнитного потока  $\Phi$ . Существует четыре способа возбуждения.

### 1. Независимое возбуждение

Обмотка возбуждения электрически не соединена с якорем. Она подключается к отдельному источнику постоянного напряжения.

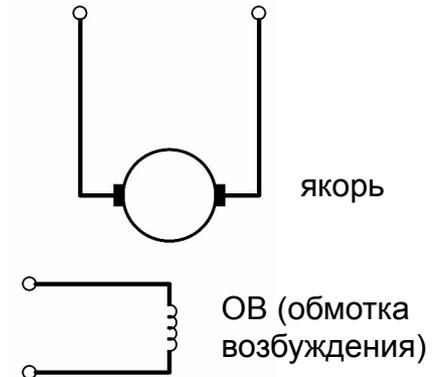
Ток возбуждения и создаваемый им магнитный поток не зависят от режима работы МПТ

$$I_{\text{в}} = \text{const}$$

$$\Phi = \text{const}$$

Используется редко, в основном в МПТ с возбуждением от постоянных магнитов. В ГПТ не используется, потому что странно, когда одному источнику напряжения (генератору) самому же нужен источник примерно такого же напряжения – белиберда же!

В ДПТ не используется, потому как выходит, что ДПТ нуждается в двух источниках постоянного напряжения: для якоря и для возбуждения. Очевидно, что можно использовать один, если якорь и возбуждение подключить к источнику параллельно.



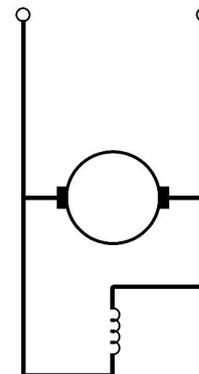
- Параллельное возбуждение

Обмотка возбуждения и обмотка якоря соединяются параллельно. Соединение осуществляется на щетках.

Ток возбуждения мал по сравнению с током якоря. Для этого обмотка возбуждения мотается тонким проводом с большим числом витков.

Это самый распространенный тип возбуждения. В генераторе получается, что генератор сам себя же снабжает током возбуждения, не нужен больше никакой источник. А двигателю нужен только один источник – меньше уже не бывает.

Позже мы увидим, что при параллельном возбуждении ДПТ обладает отличными свойствами по сравнению с другими типами возбуждения.



- Последовательное

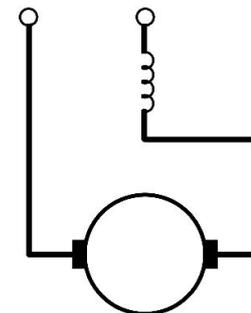
Обмотки якоря и возбуждения соединены последовательно, токи якоря и возбуждения равны.

Обмотка возбуждения мотается толстым проводом с малым количеством витков, т.к. обычно ток якоря в МПТ значительный, и нужно, чтобы обмотка возбуждения такой ток выдерживала.

Используется редко.

В ГПТ оказывается не удобно, когда возбуждение (и ЭДС) тем больше, чем больше ток нагрузки. Без нагрузки ЭДС отсутствует. Использовать такое устройство можно, но сложно (попробуй подбери требуемое напряжение для разной нагрузки!).

В ДПТ иногда можно встретить. Но минус – при последовательном возбуждении на холостом ходе частота стремится в бесконечность: такие двигатели могут работать только под нагрузкой.

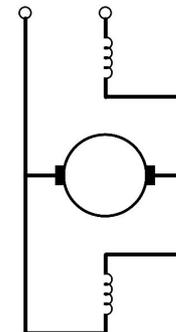


- Смешанное возбуждение

У МПТ две обмотки возбуждения – параллельная и последовательная. Обе обмотки намотаны на одних и тех же полюсах. Обмотки могут включаться согласно или встречно.

При согласном включении магнитные потоки двух обмоток складываются, увеличивая результирующий магнитный поток. При встречном – вычитаются. Этот эффект используют для создания источников тока и ЭДС, по свойствам близких к идеальным источникам. Так, в ГПТ можно получить в некотором диапазоне токов нагрузки совершенно постоянную ЭДС генератора при согласном включении и практически независимый постоянный ток нагрузки при разном напряжении при встречном. Подробнее это мы увидим, когда рассмотрим свойства и характеристики устройств.

Пока же можно просто запомнить, что способ возбуждения определяет свойства и характеристики МПТ.



## 1.7. Свойства и характеристики ГПТ

Чтобы не путаться в характеристиках, нужно понять один раз, для чего они нужны. Все характеристики что-то сообщают (чаще всего пользователю, реже – специалистам).

Для пользователя ГПТ – это некий черный ящик, к которому он что-то подключает (двигатель через муфту) и от которого что-то получает (ток и напряжение). Плюс, пользователь может что-то регулировать.

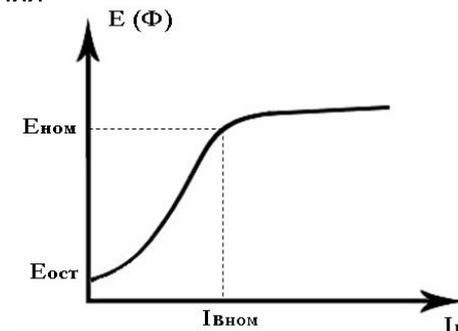
По отношению к нагрузке ГПТ является активным двухполюсником, и основная его характеристика поэтому – внешняя (или просто ВАХ). Она зависит от типа возбуждения. Глядя на нее можно судить об основных свойствах ГПТ.

Есть вспомогательные характеристики, которые могут использоваться при регулировании, например, зависимость  $E_a$  от тока возбуждения. Она помогает регулировать напряжение под конкретный приёмник. Эту характеристику называют характеристикой холостого хода.

**1. Характеристика холостого хода** – зависимость  $E_a$  от  $I_b$  при постоянной частоте вращения

Характеристика снимается в режиме холостого хода, потому что в режиме нагрузки характеристика будет зависеть от конкретной нагрузки и не будет носить универсального характера.

$E_a = c_e \cdot n \cdot \Phi$ , поэтому при  $n = \text{const}$   $E$  зависит от тока возбуждения так же, как  $\Phi$  зависит от тока возбуждения.  $\Phi$  меняется от  $I_b$  в соответствии с кривой намагничивания статора, поэтому характеристика ХХ есть масштабированная кривая намагничивания. При изменении частоты вращения характеристика ХХ пропорционально меняется.

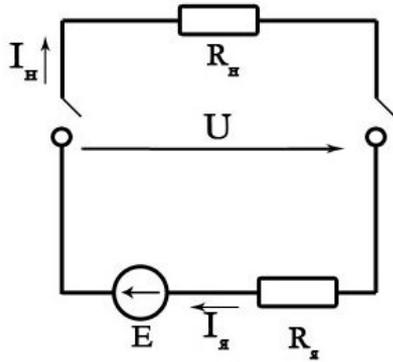


Основное, что показывает характеристика ХХ – до какого предела возможно регулирование  $E$  током возбуждения

## 2. Внешние характеристики ГПТ

Внешняя характеристика – это зависимость напряжения ГПТ от тока нагрузки. Внешние характеристики зависят от типа возбуждения ГПТ.

### 2.1. Независимое возбуждение



Напряжение возбуждения берем от отдельного источника, поэтому при любой нагрузке мы имеем одинаковый ток возбуждения и  $E_я$ .

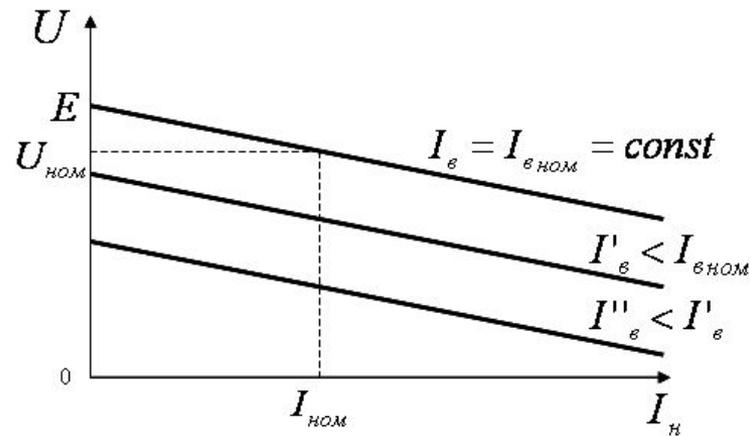
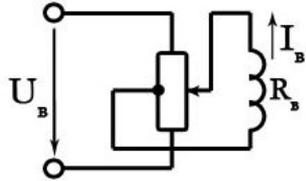
Т.к. якорь с нагрузкой включены последовательно  $I_я = I_H$ , а

$$U = E_я - I_я \cdot R_я$$

То для независимого возбуждения уравнение внешней характеристики

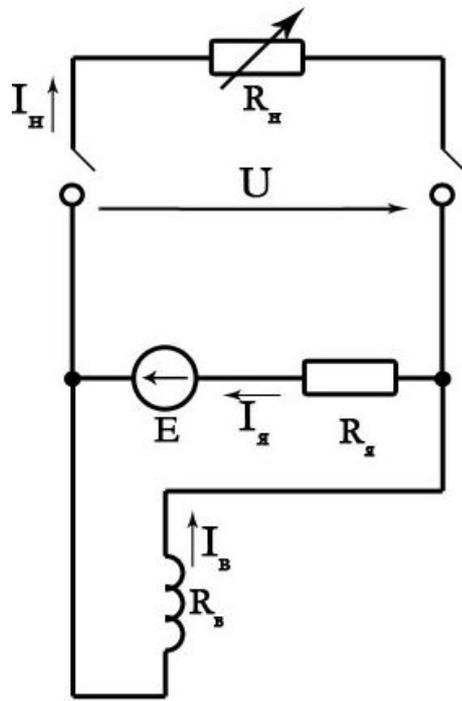
$$U = E_я - I_H \cdot R_я$$

Получили классическую внешнюю характеристику реального источника ЭДС. Учитывая возможность регулирования ЭДС изменением тока возбуждения (для этого обычно используют реостат), мы можем получить семейство характеристик:



Регулируя ток возбуждения мы можем поддерживать напряжение на нагрузке постоянным при изменении тока нагрузки. В этом плюс независимого возбуждения.

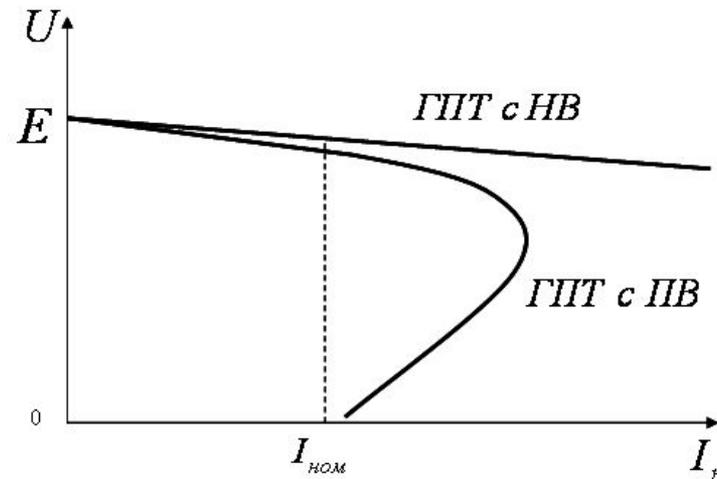
## 2.2. Параллельное возбуждение



При параллельном возбуждении ток нагрузки меньше тока якоря, т.к. часть последнего идет в цепь возбуждения  $I_{\text{н}} = I_{\text{я}} - I_{\text{в}}$

Причем ток возбуждения зависит от напряжения в нагрузке  $I_{\text{в}} = \frac{U}{R_{\text{в}}}$   
А напряжение нагрузки  $U$  падает с ростом тока нагрузки.  
Оказывается, что ток нагрузки влияет на ток возбуждения, а, следовательно и поток  $\Phi$ , и ЭДС  $E_{\text{я}}$ .

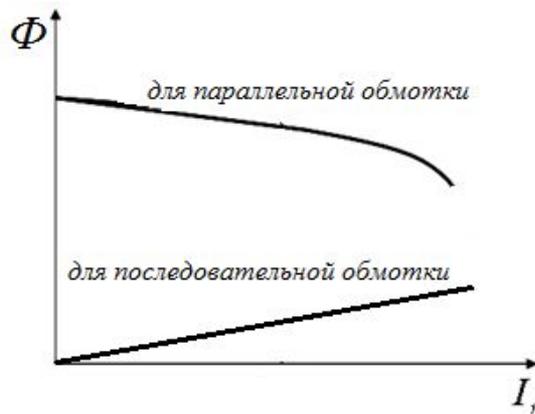
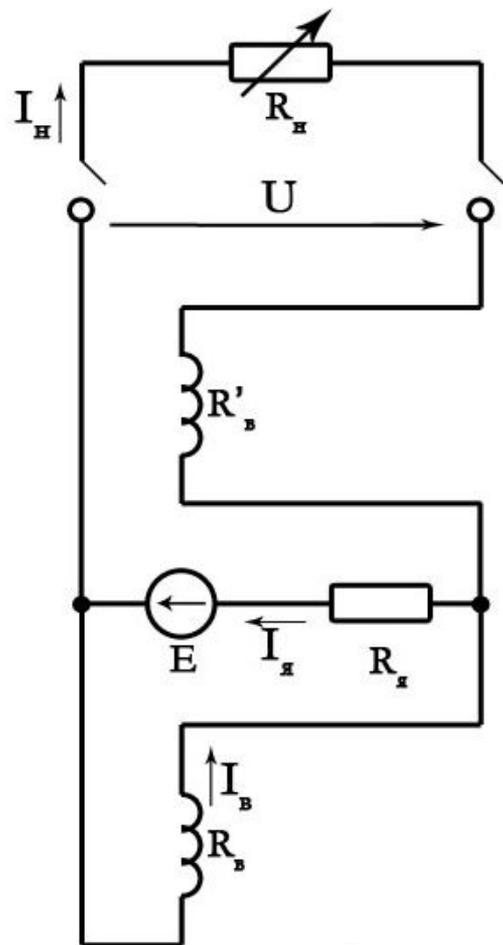
Поэтому с ростом тока нагрузки внешняя характеристика при параллельном возбуждении падает круче, чем при независимом возбуждении. Падение напряжения обусловлено не только падением напряжения на  $R_{\text{я}}$ , но и снижением  $E_{\text{я}}$  (от снижения напряжения).



В действительности при больших токах нагрузки внешняя характеристика становится круто нелинейной. Существует критическая точка, в которой меняется наклон характеристики. При достижении максимального тока происходит размагничивание магнитной цепи и генератор быстро уходит в режим короткого замыкания. Поэтому стараются работать с двухкратным запасом по току нагрузки относительно критической точки. В этом диапазоне внешняя характеристика качественно совпадает с характеристикой при независимом возбуждении.

### 2.3. Смешанное возбуждение

Используются две катушки возбуждения. Поток одной из них пропорционален напряжению генератора (как в параллельном возбуждении), а поток последовательно включённой катушки пропорционален току нагрузки. Последнее обстоятельство и используют для изменения внешней характеристики.

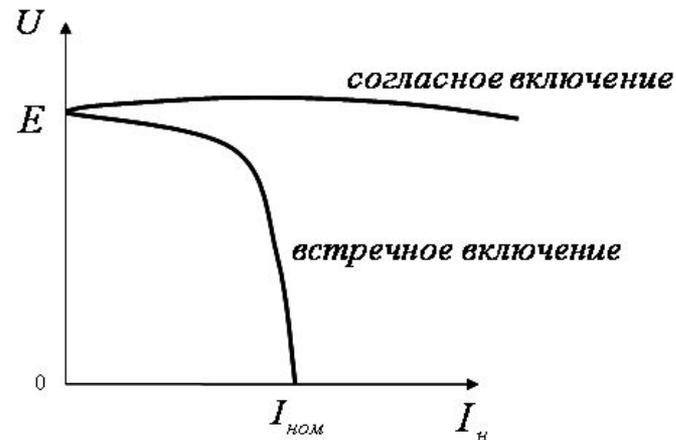


При согласном включении поток возбуждения последовательной обмотки будет складываться с потоком параллельно включенной обмотки. Можно так подобрать числа витков, чтобы суммарный поток немного бы рос с ростом тока нагрузки, что позволит компенсировать потери напряжения на  $R_я$ . При встречном включении – наоборот, потоки вычитаются и общий поток будет падать с ростом тока нагрузки круче потока параллельной катушки.

В итоге мы можем получить следующие внешние характеристики:

При согласном включении мы можем добиться независимости напряжения от нагрузки. В независимом возбуждении нужно регулировать ток возбуждения, а здесь все выходит автоматически.

При встречном включении можно добиться независимости тока от нагрузки при малых напряжениях (вблизи КЗ). Такое свойство полезно, например, при сварке. Сопротивление может меняться значительно, а ток будет постоянным, что обеспечит устойчивую дугу. Напряжение при этом меняется пропорционально сопротивлению.



### 3. Свойство самовозбуждения ГПТ параллельного возбуждения

ГПТ параллельного возбуждения снабжает сам себя током возбуждения. Когда работает. Но мы не говорили пока, а откуда он его берет при пуске? Ведь у выключенного ГПТ нет напряжения или тока возбуждения, а они нужны для работы ГПТ: что толку крутить якорь, если поля нет?!

Оказывается, что поля у выключенного ГПТ не совсем нет. Оно чуть-чуть есть!

Самовозбуждение ГПТ возможно благодаря наличию остаточного магнитного потока статора (остаточная индукция магнитопровода).

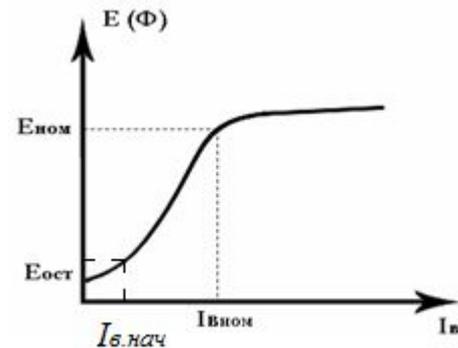
При вращении якоря остаточный поток наводит ЭДС в обмотке якоря, которая вызывает ток в обмотке возбуждения  $I_{в.нач}$ . Он, в свою очередь, увеличивает магнитный поток. Увеличение потока ведет к увеличению ЭДС, тока якоря и тока возбуждения и т.д.

$$\Phi_{ост} \rightarrow E_{ост} \rightarrow I_{в.нач} \rightarrow \Phi \uparrow \rightarrow E \uparrow \rightarrow I_{в} \uparrow \rightarrow \Phi \uparrow \dots$$

Процесс увеличения тока возбуждения заканчивается, когда напряжение на обмотке возбуждения станет равным ЭДС якоря. Это соответствует номинальному току возбуждения на участке, близком к насыщению на характеристике ХХ.

*Условия самовозбуждения:*

- 1. Наличие остаточного магнитного потока.* Магнитопровод (статор) должен быть однажды намагничен.
- 2. Совпадение по направлению остаточного и возбуждаемого потоков.* В противном случае поток от тока  $I_{в.нач}$  не увеличивает общий поток, а наоборот снижает его до нуля.
- 3. Величина сопротивления цепи возбуждения ГПТ должна быть меньше критической  $R_{кр}$ .* Если условие не выполняется, то напряжение на зажимах генератора неустойчиво и практически не превышает ЭДС остаточную. Дело в том, что характеристика ХХ (как и кривая намагничивания ферромагнетика) вблизи нуля тока возбуждения имеет горизонтальный участок. Если сопротивление цепи возбуждения велико, то ток возбуждения хоть и появляется в результате взаимодействия с остаточной ЭДС, но не приводит к росту потока и ЭДС.



## 1.8. Свойства и характеристики ДПТ

В первую очередь двигатель постоянного тока - Двигатель – устройство, которое что-то вращает. Все двигатели имеют одну общую характеристику. Совершенно не важно, какого он принципа действия. Эта характеристика связывает между собой две основные механические характеристики вращения – частоту и момент – и называется **механической характеристикой**. Она показывает свойства двигателя так же как ВАХ двухполюсника дает представление о электрических его свойствах. Кроме конкретных цифр, механическая характеристика дает понять, когда у двигателя есть свойство саморегулирования, а когда его нет.

Во вторую очередь двигатель – электрическое устройство, которое требует определенного питания, потребление которого зависит определенным образом от нагрузки. Понятие о связи электрических параметров двигателя и нагрузки дают **рабочие характеристики**. Это уже характеристики условно второго порядка.

К тому же роду относятся **пусковые характеристики**. Они говорят нам как (каким способом) пускать двигатель, сколько времени займет пуск и при какой нагрузке он возможен, а при какой - нет.

1. **Механические характеристики ДПТ.** Показывает зависимость момента ДПТ от частоты вращения.

1.1. ДПТ независимого и параллельного возбуждения

Механические характеристики ЭДПТ этих типов возбуждения совпадают, т.к. с т. зр. электротехники разницы нет: цепь возбуждения не зависит от цепи якоря в обоих случаях, уравнения состояния цепи якоря идентичны.

$$E_{\text{я}} = c_e \cdot n \cdot \Phi$$

$$M = c_m \cdot I_{\text{я}} \cdot \Phi$$

$$U = E_{\text{я}} + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}$$

Отсюда получаем уравнение механической характеристики

$$n = \frac{U}{c_e \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{я}} \cdot M}{c_e \cdot c_m \cdot \Phi^2} \quad n = n_{\text{хх}} - A \cdot M$$

Частота холостого хода зависит от напряжения якоря  $U$ . При идеальном ХХ проивоЭДС уравновешивает  $U$ , ток и момент отсутствуют. С ростом момента частота снижается. У ДПТ всегда. У других двигателей это не всегда так. Житейская логика говорит, что чем момент сопротивления больше (чем тяжелее крутить), тем частота ниже. У двигателя логика отличается от житейской: именно изменение частоты влечет изменение противоЭДС и, как следствие, тока якоря и момента!



## Свойство саморегулирования ДПТ

Свойство саморегулирования позволяет двигателю работать автономно при изменении нагрузки, без вмешательства человека. Механическая характеристика дает представление о том, когда это свойство имеется у двигателя.

**Свойство саморегулирования заключается в способности двигателей автоматически создавать вращающий момент, равный моменту сопротивления на валу.**

Посмотрим, как оно реализуется и когда. Для этого изменим момент нагрузки ДПТ и проследим переходный процесс.

Пусть ДПТ работал в установившемся режиме: момент вращения равен моменту сопротивления (или нагрузки), частота вращения постоянна.

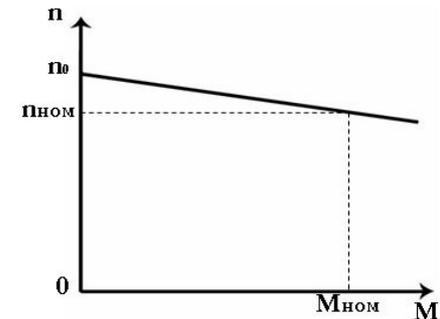
$$M_{\text{вр}} = M_c \quad n = \text{const}$$

Пусть произошло увеличение момента сопротивления, тогда, согласно уравнению механики, должна снижаться частота вращения:

$$M_{\text{вр}} - M_c = J \cdot \left( \frac{d}{dt} \Omega \right) < 0$$

Снижение частоты приводит (см. механическую характеристику) к увеличению момента вращения!

Пока частота снижается, момент вращения будет расти. Когда момент вращения уравновесит момент сопротивления, снижение частоты прекратится, и ДПТ перейдет в новое установившееся состояние с меньшей частотой и большим моментом.



Не трудно заметить, что если бы с уменьшением частоты момент ДПТ падал (т.е. наклон механической характеристики был обратным), мы бы не пришли к новому установившемуся режиму, ДПТ остановился бы. Т.е. свойство саморегулирования имеется только в том диапазоне  $n$  и  $M$  механической характеристики, где с уменьшением  $n$  мы видим рост  $M$ . ДПТ независимого и параллельного возбуждения обладают свойством саморегулирования во всем диапазоне возможных частот и моментов.

Как меняются параметры ДПТ в процессе изменения момента?

Итак, при увеличении момента сопротивления происходит снижение частоты вращения (у всех двигателей, независимо от принципа действия).

При анализе процессов нужно помнить, что магнитный поток у ДПТ независимого и параллельного возбуждения постоянен, т.к.  $\Phi$  пропорционален току возбуждения  $I_b = U / R_b = \text{const}$ .

Уменьшение частоты вызовет уменьшение ЭДС якоря и рост тока якоря (т.к. напряжение источника  $U$  зависит только от источника):

$$E_{\text{я}} = c_e \cdot n \cdot \Phi$$

$$U = E_{\text{я}} + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}$$

Увеличение тока якоря ведет к росту электромагнитного момента вращения ДПТ:

$$M_{\text{вр}} = c_m \cdot I_{\text{я}} \cdot \Phi$$

Рост тока якоря и момента вращения продолжается до тех пор, пока частота вращения падает, т.е. пока  $M_{\text{вр}} < M_c$ . В итоге ДПТ перейдет в новое установившееся состояние с меньшей частотой вращения и большим моментом.

Нужно заметить, что в установившемся режиме работы ДПТ при постоянном магнитном потоке ток якоря полностью определяется моментом, хотя в законе Ампера ток стоит справа, а сила слева, и вроде бы сила зависит от тока. Закон Ампера справедлив, но ток якоря является здесь величиной зависимой: она зависит от  $E_{\text{я}}$ , а  $E_{\text{я}}$  – от частоты, а частота – от разности моментов.

*В установившемся режиме при постоянном потоке возбуждения ток якоря определяется моментом ДПТ (моментом сопротивления), а не наоборот!*

## 1.2. ДПТ последовательного возбуждения

Уравнение механической характеристики выводится из аналогичных уравнений

$$E_{\text{я}} = c_e \cdot n \cdot \Phi \quad U = E_{\text{я}} + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}} \quad M = c_m \cdot I_{\text{я}} \cdot \Phi$$

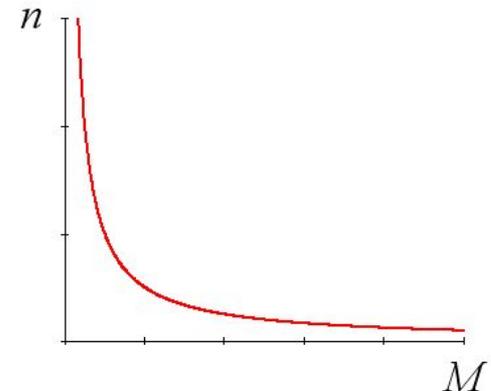
с учетом того, что поток теперь пропорционален току якоря  $\Phi = K_{\phi} \cdot I_{\text{я}}$

и обозначив  $K_1 = \frac{R_{\text{я}}}{c_e \cdot K_{\phi}}$   $K_2 = \sqrt{\frac{I}{c_e \cdot K_{\phi}}}$

получаем: 
$$n = \frac{U}{c_e \cdot K_{\phi} \cdot K_2 \cdot \sqrt{M}} - K_1$$

По виду механической характеристики можно сделать выводы:

- ДПТ последовательного возбуждения также обладает свойством саморегулирования;
- **Пуск ДПТ последовательного возбуждения без нагрузки недопустим;**
- ДПТ обладает большим пусковым моментом и позволяет регулировать частоту в широких пределах



# 1.8. Свойства и характеристики ДПТ

## 2. Пусковые характеристики.

Пусковые характеристики характеризуют работу двигателя от момента пуска, когда  $n = 0$  до установившегося режима, когда  $n = \text{const}$

### Пусковые характеристики:

- кратность пускового тока  $I_{\text{пуск}} / I_{\text{ном}}$
- кратность пускового момента  $M_{\text{пуск}} / M_{\text{ном}}$
- время пуска

В момент пуска  $n = 0$ , это вызывает бросок тока, т.к. ток определяется разностью напряжения питания  $U$  и противоЭДС (которая в момент пуска отсутствует)

$$E_{\text{я}} = c_e \cdot n \cdot \Phi = 0$$
$$I_{\text{я}} = \frac{U - E_{\text{я}}}{R_{\text{я}}} = U / R_{\text{я}} \quad \text{В момент пуска ток максимален}$$

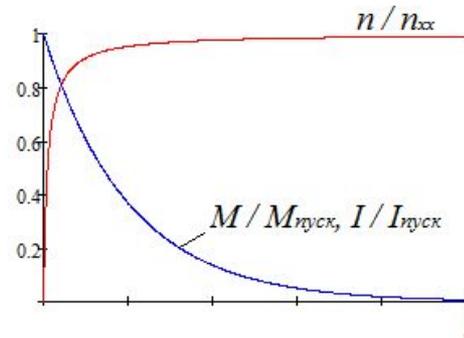
Т.к.  $M = c_m \cdot I_{\text{я}} \cdot \Phi$ , то при пуске момент ЖПТ будем максимально возможным.

При пуске ток максимален, он в несколько раз превышает номинальные значения. Соответственно мощность, выделяющаяся в обмотке якоря пропорциональна квадрату тока и может уже в десятки раз превосходить номинальные значения. Если двигатель мощный или запускается под нагрузкой (время пуска будет больше, чем при пуске без нагрузки), обмотка якоря может сгореть. Отсюда разные способы запуска ДПТ в зависимости от его габаритов и мощности.

### **Способы пуска ДПТ:**

1. Прямое включение в сеть.

Применяется для двигателей малой мощности, когда время пуска мало, а сопротивление якоря – велико. За время пуска обмотка якоря не успевает критически нагреться. Обычно это бытовые устройства типа вентиляторов, шуруповертов и прочего ручного инструмента.

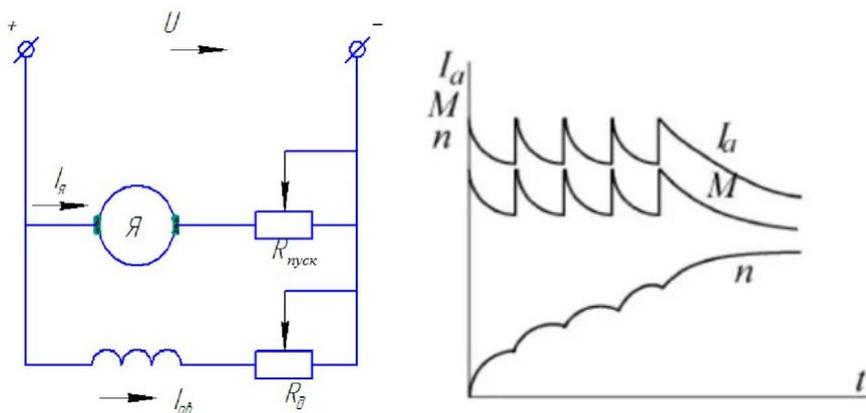


В ДПТ помощнее вентилятора нужно ограничивать пусковой ток якоря. Из выражения для пускового тока видно, что снизить ток можно либо увеличив сопротивление якоря, либо снизив напряжение якоря:

$$I_{я.пуск} = U / R_я$$

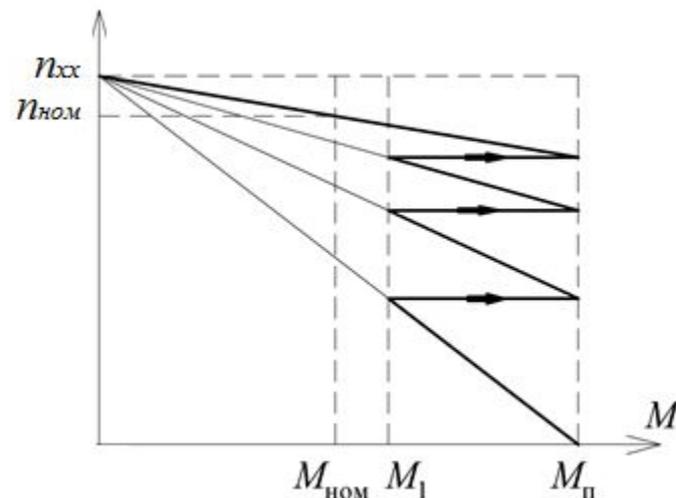
## 2. Пуск с помощью пускового реостата.

Применяется в мощных ДПТ. Реостат включают последовательно с якорем. Пусковой реостат работает короткое время и служит для ограничения бросков пускового тока. Сразу после пуска значение сопротивления реостата устанавливают равным нулю.



Как правило, сопротивление реостат изменяют дискретно, и в процессе пуска параметры ДПТ меняются во времени неравномерно.

Из уравнения механической характеристики мы видим, что от  $R_я$  зависит ее наклон и, как следствие, пусковой момент. При отключении секций пускового реостата мы переходим на новую механическую характеристику. Обычно переключать стараются так, чтобы находится при разных значениях реостата примерно в одной области токов якоря и моментов.



Для «очень мощных» ДПТ реостатный пуск не применяют, т.к. размер реостата пропорционален квадрату мощности ДПТ, и реостат становится заметно больше двигателя.

## 3. Пуск при пониженном напряжении.

Применяется в очень мощных ДПТ, когда пусковой реостат становится чрезмерно громоздким. Способ требует наличия регулируемого источника напряжения. Обычно это устройства на основе частотного преобразователя, где постоянное напряжение преобразуется в импульсное переменное, то уже преобразуется в переменное нужной амплитуды, которое выпрямляется и подается на якорь. Такие устройства дороже реостатов, но имеют высокий КПД, программируются и позволяют не только запускать ДПТ, но и управлять его частотой вращения.

## 1.9. Регулирование частоты вращения ДПТ

Вопрос о регулировании частоты вращения понятен: не всегда нужно вращать все устройства с частотой 2769 об/мин. Часто разным устройствам (нагрузке – генератору, редуктору, колесу автомобиля) требуется очень разная частота вращения, а многие механизмы в принципе требуют изменения частоты вращения в процессе работы.

Частота вращения связана с моментом и изменяется при изменении нагрузки, но это не регулирование, а саморегулирование ДПТ. Поэтому регулирование частоты вращения рассматривают при постоянном моменте нагрузки на валу ДПТ. Рассмотрим ДПТ параллельного возбуждения, т.к. это самые распространенные ДПТ.

Изменить частоту вращения можно, только изменив вид механической характеристики. Из уравнения характеристики

$$n = \frac{U}{c_e \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{я}} \cdot M}{c_e \cdot c_m \cdot \Phi^2}$$

следует, что мы можем поменять три величины, чтобы изменить частоту при постоянном моменте – сопротивление якоря, напряжение и магнитный поток (регулируя ток возбуждения).

### 1. Реостатное регулирование: $R_{\text{я}} = \text{var}$

Реостат включается последовательно с якорем аналогично пусковому реостату, но рассчитан на постоянную работу. Из уравнения  $n(M)$  видно, что увеличивается наклон характеристики при постоянной частоте холостого хода. (на холостом ходе момент и ток якоря равны нулю, а когда нет тока совершенно не важно, какое в цепи сопротивление – оно ни на что не может оказывать влияния). Частота при ненулевых моментах снижается при введении регулировочного сопротивления. Эффект от введения реостата зависит от величины момента нагрузки.

Как происходит процесс регулирования

Рассуждать можно «через статику» и «через динамику». Сначала через статику

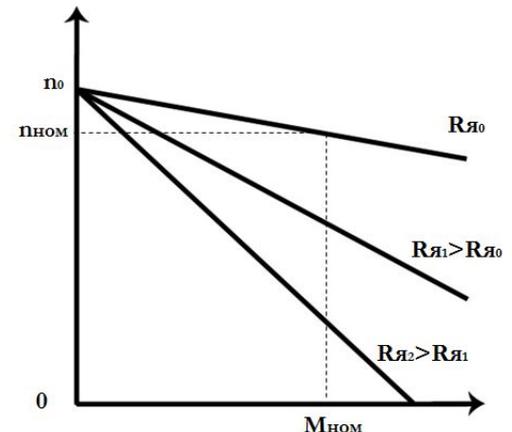
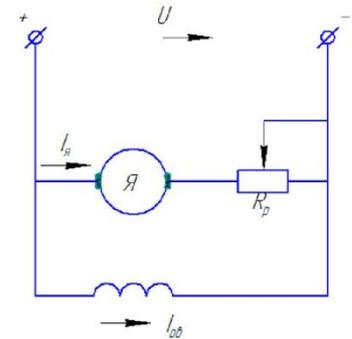
При постоянном моменте нагрузки ток якоря будет постоянен (см. саморегулирование). Поэтому увеличение сопротивления якоря не приводит к изменению тока якоря при постоянном магнитном потоке  $\Phi$ :

$$M = c_m \cdot I_{\text{я}} \cdot \Phi = \text{const} \Rightarrow I_{\text{я}} = \text{const}$$

Из уравнения состояния цепи якоря следует, что при постоянном напряжении  $U$  и увеличении сопротивления якоря должно упасть ЭДС якоря:  $U = E_{\text{я}} + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}$

$$E_{\text{я}} = c_e \cdot n \cdot \Phi$$

При постоянном напряжении питания  $U$  ток возбуждения и магнитный поток постоянны, и ЭДС может снизиться только из-за снижения частоты вращения.



Через «динамику»:

Пусть двигатель работал про постоянной частоте вращения с моментом  $M_1$ .

Теперь мы увеличили сопротивление якоря. При тех же  $U$  и  $E_{я}$  увеличение  $R_{я}$  вызовет снижение тока якоря и момента:

$$I_{я} \downarrow \Rightarrow M = c_m \cdot I_{я} \cdot \Phi \downarrow$$

Снижение момента вращения при постоянном моменте нагрузки  $M_1$  приведет к снижению частоты вращения  $n$ :

$$M_{вр} - M_c = J \cdot \left( \frac{d}{dt} \Omega \right) < 0$$

Снижение частоты приводит при постоянном потоке к снижению  $E_{я}$ :  $E_{я} = c_e \cdot n \cdot \Phi$

Из уравнения состояния цепи якоря следует, что при постоянном напряжении  $U$  и снижение ЭДС должно компенсироваться ростом тока якоря:  $U = E_{я} + I_{я} \cdot R_{я}$

Рост тока якоря вызывает рост момента вращения. Описанный переходный процесс окончится, когда момент вращения уравнивает момент сопротивления.

*Как бы мы ни рассуждали, результат одинаков: частота снизилась при увеличении  $R_{я}$ . Как именно рассуждать - вы выбираете сами.*

Плюсы и минусы реостатного регулирования.

Плюсы:

- Регулировать частоту можно вплоть до нуля, т.е. в широких пределах.

Минусы:

-Эффект от регулирования зависит от момента

-Частота может только уменьшаться

-Очень-очень неэкономичный способ. Последнее прокомментирую.

При реостатном регулировании отдаваемая в нагрузку механическая мощность падает за счет снижения частоты вращения.

Это не зависит от нас и от ДПТ никак  $P_2 = M \cdot \Omega$  А как меняется потребляемая мощность?  $P_1 = I \cdot U$

$$I_{я} = const, I_{в} = U / R_{в} = const \Rightarrow I = I_{я} + I_{в} = const \Rightarrow P_1 = I \cdot U = const$$

Оказывается, потребляемая мощность не зависит от сопротивления якоря! Вывод: если при постоянной потребляемой мощности полезная снижается, значит растут потери внутри устройства. По сути, реостатное регулирование осуществляется за счет рассеивания на регулировочном реостате части мощности источника. Если частота снизилась в два раза, значит КПД уменьшился на 50%.

*Кстати! Раньше троллейбусы и трамваи управляли скоростью с помощью реостатного регулирования. Автотранспорт – штука мощная. И регулировочные реостаты занимали... всю их крышу.*

## 2. Полюсное регулирование: $\Phi = var$ (регулирование потока полюсов)

Регулирование потока возбуждения осуществляют путем изменения сопротивления обмотки возбуждения

При изменении потока изменяется частота холостого хода и наклон механической характеристики. Т.о. частота может увеличиться или уменьшиться в зависимости от значения момента нагрузки.

$$n = \frac{U}{c_e \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{я}} \cdot M}{c_e \cdot c_m \cdot \Phi^2}$$

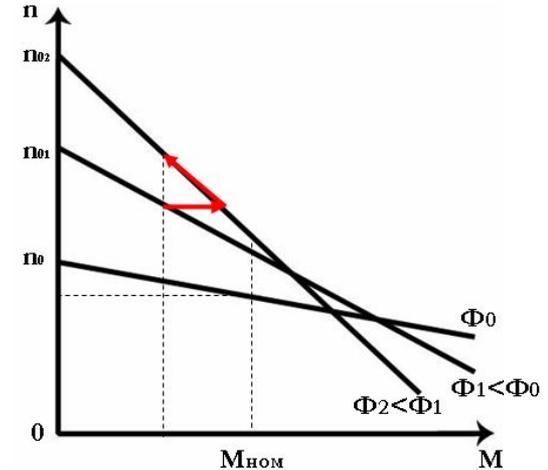
Т.е. эффект регулирования различается в зависимости от нагрузки. Не очень удобно....

Вторая тонкость полюсного регулирования: при изменении потока  $\Phi$  меняется ток якоря:  $\Phi \downarrow \Rightarrow$  при  $M = c_m \cdot I_{\text{я}} \cdot \Phi = \text{const } I_{\text{я}} \uparrow$   
Если при номинальном моменте снизить в два раза  $\Phi$ , мы получим двукратный рост тока и четырехкратный рост мощности нагрева якоря. Якорь может подгореть.

К тому же снижение  $\Phi$  приводит к снижению пускового момента и перегрузочной способности (отношение момента нагрузки к максимальному моменту ДПТ; запас по моменту нужен на случай увеличения нагрузки). Поэтому полюсное регулирование применяют в основном при моментах меньше номинальных, чтоб обеспечить ток якоря около номинального значения и сохранить перегрузочную способность.

*Достоинство* полюсного регулирования – экономичность.

*Недостаток* – малый диапазон регулирования частоты, возможность регулирования только при нагрузке, менее номинальной



### 3. Якорное регулирование: $U = var$

Осуществляется с помощью регулируемого источника напряжения.

Применяется только при независимом возбуждении. В ДПТ параллельного возбуждения изменение напряжения источника  $U$  вызывает одновременно полюсное регулирование частоты. Эти два способа регулирования компенсируют друг друга.

При независимом возбуждении регулирование  $U$  приводит к изменению частоты холостого хода при том же наклоне механической характеристики:

$$n = \frac{U}{c_e \cdot \Phi} - \frac{R_{\text{я}} \cdot M}{c_e \cdot c_M \cdot \Phi^2}$$

Процесс регулирования:

Т.к. при постоянном потоке  $\Phi$  ток якоря определяется моментом нагрузки, то он постоянен  $I_{\text{я}} = const$

Из уравнения состояния якоря  $U = E_{\text{я}} + I_{\text{я}} \cdot R_{\text{я}}$

следует, что при изменении  $U$  должно измениться ЭДС

При постоянном потоке  $\Phi$  ЭДС якоря может измениться только при изменении частоты вращения  $E_{\text{я}} = c_e \cdot n \cdot \Phi$

Достоинства якорного регулирования:

- Сохраняется наклон характеристики,
- возможно как снижение, так и повышение частоты.
- Самое экономичное: регулирование происходит за счет изменения потребляемой мощности

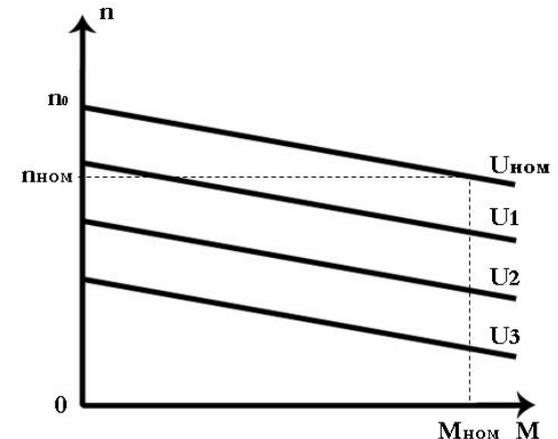
$$I_{\text{я}} = const, I_{\text{в}} = U / R_{\text{в}} = const \Rightarrow I = I_{\text{я}} + I_{\text{в}} = const \Rightarrow P_1 = I \cdot U$$

$P_1$  пропорционально  $U$ .

С другой стороны,  $n_{\text{хх}}$  тоже пропорциональна  $U$ . В итоге КПД ДПТ при якорном регулировании слабо изменяется.

Недостаток:

требуется источник регулируемого напряжения

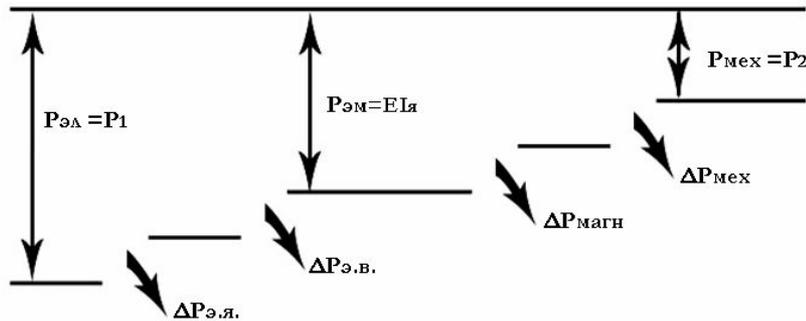


*Кстати. 1) Для регулирования мощных ДПТ (типа автотранспорта) применяют именно якорное регулирование. Источник регулируемого напряжения – не дешевая штука, но он обойдется заметно дешевле, чем ездить с КПД 20-30% и реостатами на крыше.*

*2) ДПТ параллельного возбуждения тоже регулируются якорным способом. Но не всегда. Компенсация якорного регулирования полюсным происходит только в точке идеального холостого хода. На самом деле эта точка не достижима, ДПТ всегда работает с каким-то моментом. Чем выше момент, тем заметнее эффект от регулирования (т.к. меняется наклон мех. характеристики, аналогично реостатному регулированию, только процесс экономичней). Бытовые электроинструменты имеют внутри ДПТ параллельного возбуждения и регулируются якорным способом. Потому что требований по точности регулирования и перегрузочной способности жестких нет. Электрическая дрель или миксер – это не электромобиль, вы вряд ли будете сильно страдать от потери перегрузочной способности (вращение прекращается, в быту это называется «застряло» и «заело»). В электромобиле, если «заест», вы остановитесь, а двигатель может сгореть. ...У всех способов регулирования своя ниша. И даже когда в учебнике написано «так не регулируют», иногда и «так» регулируют.*

## 1.10. Преобразования энергии в ДПТ

### Двигатель постоянного тока



К ДПТ подводят электрическую мощность  $P_1$ . Она тратится на нагрев обмотки якоря током якоря  $\Delta P_{\text{э.я}}$  и обмотки возбуждения током возбуждения  $\Delta P_{\text{э.в}}$ . Оставшаяся мощность называется электромагнитной мощностью – это мощность источника ЭДС в схеме замещения цепи якоря, она в результате силового взаимодействия приводит к созданию момента вращения и вращению якоря.

При вращении якорь перемагничивается, поэтому он нагревается в следствие потерь на перемагничивания (гистерезис) и вихревые токи  $\Delta P_{\text{магн}}$ . Оставшаяся механическая мощность за исключением механических потерь на трение передается в нагрузку.

$P_1 = U \cdot I$  - электрическая мощность, потребляемая от источника постоянного напряжения

$P_2 = M \cdot \Omega$  - механическая мощность, отдаваемая в нагрузку

$\Delta P_{\text{яэ}} = R_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}^2$  - электрические потери в обмотке якоря

$\Delta P_{\text{бэ}} = R_{\text{б}} \cdot I_{\text{б}}^2$  - электрические потери в обмотке возбуждения

$P_{\text{эм}} = E_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}$  - электромагнитная мощность (электрическая мощность, преобразованная якорем в мощность вращательного движения якоря)

$\Delta P_{\text{магн}}$  - магнитные потери (потери на перемагничивание вращающегося якоря в магнитном поле статора)

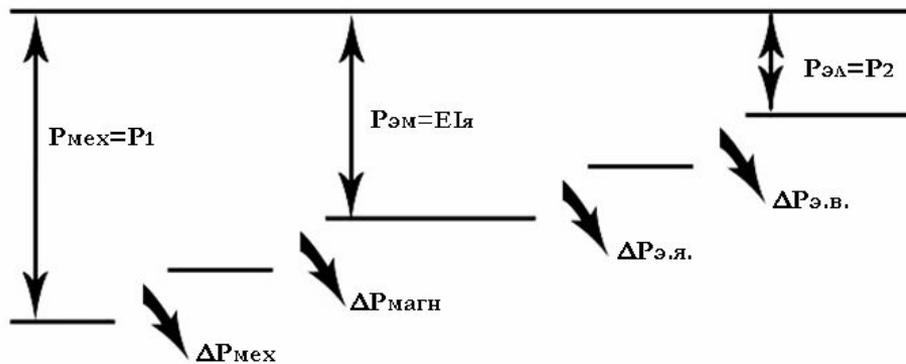
$\Delta P_{\text{мех}}$  - механические потери на трение

Уравнение баланса мощностей (получается домножением уравнения состояния цепи якоря на ток якоря)

$$U \cdot I_{\text{я}} = I_{\text{я}}^2 \cdot R_{\text{я}} + E_{\text{я}} \cdot I_{\text{я}}$$

кпд ДПТ  $\eta = \frac{P_2}{P_1}$

- Генератор постоянного тока



К ГПТ подводят механическую мощность  $P_1$ . Она тратится на преодоление трения  $\Delta P_{\text{мех}}$  и потери на перемагничивание якоря в поле статора  $\Delta P_{\text{магн}}$ . Оставшаяся мощность называется электромагнитной (это мощность источника ЭДС в схеме замещения цепи якоря), она в результате силового взаимодействия приводит к появлению ЭДС  $E_{\text{я}}$  и тока якоря. Электромагнитная мощность расходуется на тепловые потери в обмотках якоря  $\Delta P_{\text{э.я}}$  и возбуждения  $\Delta P_{\text{э.в.}}$ . Оставшаяся мощность – электрическая – передается в нагрузку.

## Общая характеристика МПТ

### Достоинства:

- Имеют большой диапазон мощностей (1 мкВт – десятки кВт)
- Обладают лучшими пусковыми характеристиками по сравнению с двигателями переменного тока
- Позволяют регулировать частоту вращения в широких пределах
- Позволяют работать от однофазной цепи переменного тока (ДПТ параллельного возбуждения еще называют универсальными коллекторными двигателями)

### Недостатки:

- Из всех типов машин – наименее надежные (щеточно-коллекторный узел)
- Конструктивно сложные и, следовательно, имеют сложную технологию изготовления, и поэтому дорогие.
- Искрение в щетках ограничивает применение МПТ в агрессивных и взрывоопасных средах

Сегодня ниша ДПТ – это в основном маломощная бытовая техника, работающая от аккумуляторов или от однофазной розетки, а также область мощных автономных устройств – автотранспорт. Ниша средней мощности занята сейчас асинхронными двигателями, на порядок более простыми, дешевыми и надежными. Очень большая мощность – сотни кВт – область применения синхронных двигателей (секрет еще в том, что мощная сеть переменного тока есть, а сети постоянного тока – нет, а делать из переменного постоянный – дорого и незачем, раз сразу есть двигатели переменного тока). Для сложных сред и где нужна повышенная надежность в сочетании с работой от сети постоянного тока (авиация) применяют вентильные бесколлекторные двигатели постоянного тока, они являются вариацией синхронной машины, о которых речь пойдет позже. Ну и ГПТ всегда применяются для получения постоянного напряжения там, где нет электрической сети: дизель-генераторы. Где сеть есть, проще пользоваться электронными устройствами.

# Задача 1

ГПТ параллельного возбуждения имеет:

- Номинальную мощность  $P_{\text{НОМ}} = 16,5$  кВт
- Ном. напряжение  $U_{\text{НОМ}} = 115$  В
- Ном. частота вращения  $n_{\text{НОМ}} = 1460$  об/мин
- Сопротивления якоря  $R_{\text{я}} = 0,0424$  Ом, возбуждения –  $R_{\text{в}} = 20,6$  Ом
- Число пар полюсов  $p = 2$ .

Определить:

1. Электромагнитный момент ГПТ в номинальном режиме.
2. КПД ГПТ
3. Относительное снижение напряжения при переходе от холостого хода к номинальному режиму
4. Построить рабочий участок внешней характеристики.  
Механическими потерями пренебречь.

# Задача 2

ДПТ параллельного возбуждения имеет следующие номинальные параметры:  $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$ ,  $I_{\text{ном}} = 21,71 \text{ А}$ ,  $n_{\text{ном}} = 740 \text{ об/мин}$ .

Сопротивление обмотки якоря в нагретом состоянии  $R_{\text{я}} = 1,165 \text{ Ом}$ , сопротивление цепи возбуждения  $R_{\text{в}} = 310 \text{ Ом}$ .

Найти:

1. Сопротивление пускового реостата, который необходим для обеспечения пускового тока якоря  $I_{\text{пуск.я}} = 2,5 I_{\text{ном.я}}$ .
2. С каким добавочным сопротивлением  $R_{\text{доб}}$  необходимо включить реостат в цепь якоря, чтобы при неизменном моменте двигатель понизил частоту вращения до  $n_2 = 500 \text{ об/мин}$ .? Как изменится при этом КПД?
3. Построить участок естественной и искусственной механических характеристик.  
Механическими потерями пренебречь.

## Задача 3

ДПТ параллельного возбуждения имеет следующие данные  $U_{\text{ном}} = 220 \text{ В}$ ,  $I_{\text{ном}} = 40 \text{ А}$ ,  $n_{\text{ном}} = 1000 \text{ об/мин}$ ,  $I_{\text{в}} = 1,2 \text{ А}$ , сопротивление обмотки якоря в нагретом состоянии  $R_{\text{я}} = 0,5 \text{ Ом}$ .

Как изменятся частота вращения и ток якоря при неизменном моменте, если подведенное к якорю напряжение уменьшить до 180 В, а ток возбуждения поддерживать неизменным?